

小尺度城市碳汇单元植物景观营建方法及设计研究

Research on the Construction Method and Design of Plant Landscape in Small-Scale Urban Carbon Sink Units

杨 阳* 韩浩宇 李家豪
YANG Yang* HAN Haoyu LI Jiahao

(西安工程大学服装与艺术设计学院, 西安 710048)
(College of Apparel & Art design, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi, China, 710048)

文章编号: 1000-0283(2025)07-0014-09
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2025. 07. 0014. 002
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2025-01-14
修回日期: 2025-02-20

摘 要
从小尺度绿地的视角探究碳汇效益, 能够为未来城市绿色低碳空间的构建与研究提供更多的理论支持。通过对西安市已建成绿地的调研, 计算筛选高固碳和低维护植物种类, 探究绿地、植物、碳汇的关系尺度, 构建“乔灌丛+草本群落结构”“草本群落结构”的典型植物群落配置模式, 并总结与地域特征相适宜的城市碳汇单元植物景观设计方法。分析基于城市小尺度绿地碳汇单元的植物景观营建途径, 实现绿地、植物、碳汇之间的耦合, 提出兼具地域性特征与高效碳汇效益的植物景观设计方法及策略, 以作为实现城市“双碳”目标的重要途径。综合现阶段城市绿地单元植物景观营建成果, 将城市小尺度绿地营建与高碳汇植物景观设计有机结合, 期望为城市小尺度碳汇单元的植物景观构建提供新思路。

关键词
碳汇单元; 小尺度绿地; 碳汇效益; 植物群落

Abstract
Exploring the benefits of carbon sinks from the perspective of small-scale green spaces can provide more theoretical support for the development and research of future urban green and low-carbon spaces. By researching the existing green spaces in Xi'an, this study attempts to screen the plant species with high carbon fixation and low maintenance through calculation, explore the relationship scale between green spaces, plants, and carbon sinks, construct a typical plant community configuration model of “tree shrub + herbaceous community structure” “herbaceous community structure”, and summarize a plant landscape design method suitable for regional characteristics of urban carbon sink units. Analyzing the process of plant landscape construction based on the carbon sink unit of small-scale urban green spaces requires achieving a coupling between green spaces, plants, and carbon sinks. The methods and strategies of plant landscape design, which incorporate regional characteristics and promote efficient carbon sequestration, are proposed as an essential approach to achieving the urban “dual carbon” goals. Based on the current achievements in urban green space unit plant landscape construction, this paper organically combines urban small-scale green space construction with high carbon sink plant landscape design, aiming to provide new ideas for the construction of plant landscapes in urban small-scale carbon sink units.

Keywords
carbon sink unit; small-scale green space; carbon sink benefits; plant communities

杨 阳
1987年生/男/河南商丘人/博士/副教授/
研究方向为低碳景观设计理论与实践

韩浩宇
2000年生/男/山东东营人/在读硕士研究生/
研究方向为风景园林规划与设计

李家豪
1999年生/男/江西赣州人/在读硕士研究生/
研究方向为风景园林规划与设计

在自然生态中, 植物是消解二氧化碳的主要载体, 其碳汇效益可分为直接碳效益和间接碳效益, 对减少人类活动所产生的二氧化碳具有极大的作用, 由此便衍生出以碳汇为目的城市园林景观——低碳景观^[1]。中国目前正处于资源转型发展的关键时期, 明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”的“双碳”目标。积极发挥低碳景观的服务

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: yangyang5852@163.com

基金项目:
陕西省哲学社会科学专项一般项目“遗产活化视角下长城国家文化公园(陕西段)景观营造策略研究”(编号: 2025YB0194)

功能，提升城市绿地的碳汇能力，能够促进实现“双碳”目标^[2]。

城市绿地系统中，小尺度绿地因其覆盖范围广、形式多样的特征成为重要组成部分。国际研究数据显示，近十年间全球大型城市群绿地面积整体提升，其中新增绿化面积主要来源于中小型绿地单元^[3]。小尺度绿地在提升城市生态系统服务效能方面具有显著优势，尤其在碳汇功能强化和微气候调节方面展现突出潜力^[4]。这类绿地因空间形态的灵活性和功能复合性，在城市更新项目中展现出较强的适应性。但当前城市绿地大多被碎片化分布在城市建设用地之间，存在面积小、植被覆盖率低、群落结构紊乱等问题，极大制约了绿地固碳释氧功效的发挥。因此如何提升城市小尺度绿地的碳汇效益，成为目前关注的领域。

1 小尺度城市碳汇单元植物景观营建的必要性

1.1 小尺度城市碳汇单元植物景观构建不足之处

在小尺度城市碳汇单元植物景观构建过程中，存在着多个层面的不足。首先，由于城市空间本身的局限性，绿地面积有限，许多项目在规划设计时难以兼顾生态连通性与整体生态网络的构建，导致碳汇单元连通性缺失。斑块间缺乏生态廊道衔接，导致碳汇效益孤立化。例如，生物滞留设施与周边微绿地间植被类型差异显著，碳汇协同效率较低^[5]。其次，群落层次单一，空间利用效率低。受限于小尺度绿地的碎片化布局，现有群落多采用“灌—草”或单一乔木层结构，三维绿量不足，年固碳量较复层结构相对较低^[6]。此外，维护管理粗放，现有的管理与监控机制多停留在初步建设阶段，缺乏长期动态监

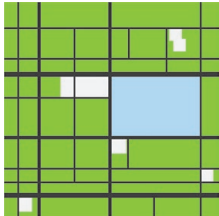
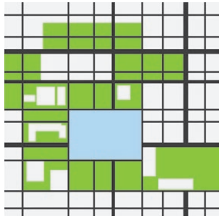
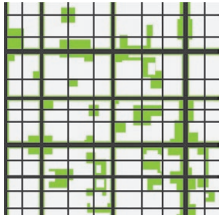
测和适时调控，导致生态系统在遭受环境变化或外界干扰时难以迅速调整和恢复^[7]。综合来看，这些不足不仅影响了小尺度城市绿地碳汇单元在固碳效能上的发挥，也削弱了其在调节城市微气候、提升生物多样性和改善居民生活环境等多重生态服务功能，亟需在规划设计、物种配置、土壤与水分管理以及后续的生态监测等方面进行系统性优化和创新。

1.2 小尺度城市碳汇单元空间布局与规划

城市区域范围内存在大量破碎化的小尺度绿地，它们是可以通过生境营造、植

物生态设计等措施进行提质增效的典型固碳空间，对于减排增汇具有重要价值。因此，这些小尺度绿地所形成的斑块或廊道结构可称为碳汇单元。其中，斑块结构是绿地空间的主体部分，而廊道结构可增加绿地空间格局的连通性^[8]，从而缓解城市生境破碎化现象，提升城市生态系统的整体碳储存能力（表1）。城市绿地空间格局是碳储量变化的基础条件，但城市绿地空间格局受到自然演替和人为活动的影响，使得绿地斑块的形状、面积、数量和类型在空间上呈现非规则式分布与组合^[9]。城市生态系统中的

表1 城市绿地空间格局
Tab. 1 Urban green space pattern

空间形式 Spatial form	斑块划分 Plaque division	生境类型 Habitat type	示意图 Diagram
斑块结构	大型绿地斑块	综合公园、社区公园、城市林地、湿地公园	
	中型绿地斑块	社区公园、城市用地附属绿地、游园	
	小型绿地斑块	附属微绿地、生物滞留设施、屋顶绿化、公园绿地小型斑块、立体绿化	
廊道结构	廊道	城市绿道、道路旁带状绿地、城市带状公园、河流廊道	

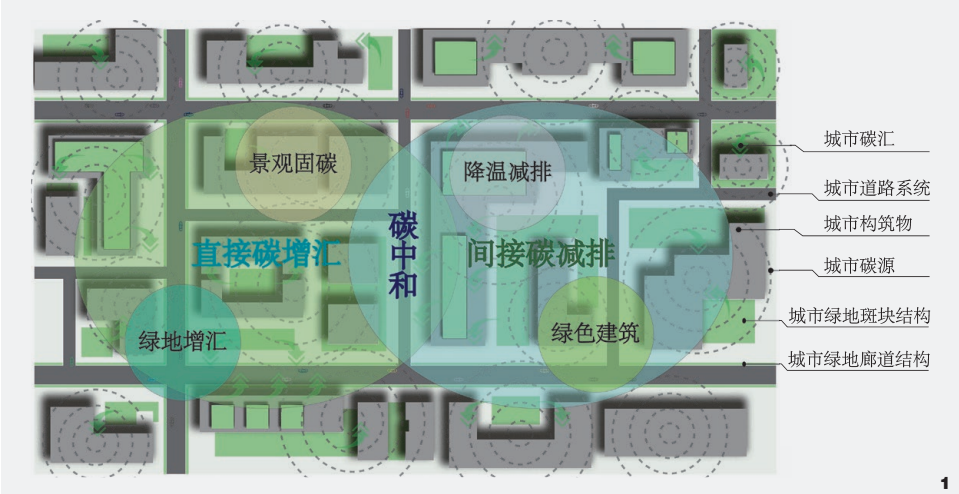


图1 城市碳汇与绿地空间
Fig. 1 Urban carbon sink and green space

信息、物质和能量的变化与发展在很大程度上依赖于绿地空间，如同城市“肺泡”的小尺度绿地发挥的作用不容忽视。因此，在实现“双碳”目标的背景下，研究城市小尺度绿地空间的碳汇提升途径显得尤为重要^[10]。

在当前城市低碳绿地研究中，单一地从城市尺度或者区域尺度进行研究往往不能解决绿地在景观全生命周期中的碳汇问题。因此结合绿地碳汇模拟和优化设计实践，明确以植物景观设计作为小尺度碳汇单元的主要影响因素，通过介入人工干预的手段，采用生境营造、植物群落配置等方式才能对现实研究提出可行性的方案。故本研究从西安城市绿地空间格局入手，基于对城市绿地空间分类，通过模拟不同类型下小尺度绿地空间格局与碳汇之间的关系，探索小尺度绿地低碳植物景观的设计方法^[11]。

营建城市碳汇则需依据自然规律，强调绿地单元以自然生态为导向，从碳汇、碳循环、固碳等角度对绿地进行形态设计、种植设计及管护，强化其中固碳景观要素的作用，发挥生态恢复能力和碳汇作用（图1）。

基于城市有限的土地资源，扩大绿地规模以增加碳汇的方式显然不适合作为研究范式。因此，针对城市空间中现存微小型绿地，通过合理布局绿地景观空间、构建高效

碳汇植物群落组构、培育并使用乡土性低碳植物材料等措施才是优化城市碳汇单元的更为有效的措施。尤其是作为绿地单元核心要素的植物，在绿地生态系统中扮演着重要角色，它们通过释放O₂和吸收CO₂来固定空气中的碳，成为不可替代的碳汇因子^[12]。

2 研究区域与方法

2.1 研究样地选择

本研究根据小尺度绿地碳汇单元的概念与特征，选取西安市主城区的城市附属微绿地、生物滞留设施、屋顶花园等不同类型共17处绿地单元的典型绿地，对其进行实地调研（表2），共测定102个样方，其中46个样方（1 m×1 m）用于测量地被植物群落固碳量，剩余56个样方（20 m×20 m）用于测量乔灌木群落固碳量。这些绿地都处于高密度碳源的城区中，具有可达性强、使用率高、服务

表2 调研地点类型划分
Tab. 2 Classification of research location types

编号 No.	绿地类型 Green space type	地点 Location	所在区域 Area
1	城市附属微绿地	海珀紫庭南侧（居住区微绿地）	雁塔区
2		太白南路西部电子社区（公共区微绿地）	雁塔区
3		太白印象城前广场（商业区微绿地）	碑林区
4		环城公园前公交站台（道路微绿地）	碑林区
5		西安工程大学金花校区（校园微绿地）	碑林区
6	生物滞留设施	西部云谷二期（下凹式绿地）	西咸新区
7		沣西里（雨水花园）	西咸新区
8		中心绿廊（湿塘）	西咸新区
9		统一西路（植草沟）	西咸新区
10	屋顶花园	MOMOPARK 屋顶花园	雁塔区
11		西部云谷二期屋顶花园	西咸新区
12	公园绿地小型斑块	兴庆宫公园	碑林区
13		长乐公园	碑林区
14		西安世博园	灞桥区
15		沣西新城管委会	西咸新区
16	立体绿化	乐荟中心	雁塔区
17		西安北站	未央区

人群范围广、用地属性多样的特点，并且面积均在1 000 m²以内。根据调研计算筛选高固碳植物种类，明确现有小尺度绿地植物生长现状问题，并归纳总结植物景观营建策略和设计模式。

2.2 碳汇计算模型与方法

本研究中植物碳汇的测算办法采用Li-6400便携式光合测定仪，于2024年4–6月进行观测，选择天气晴朗的日子对所选植物的光合速率进行确定。在8:00–18:00每2 h测定一次，选择生长良好且各性质相近三株为待测植物，每株植物选择多个待测叶片进行观测，地被

植物在群落内按对角线选取三个叶片测试，每个叶片取3~6个瞬时光合速率值作为重复。假定光合有效辐射每天按10 h计算^[13]，则植物净同化量计算见公式(1)。

$$P = \sum_{i=1}^j [\frac{(p_{i+1}+p_i)}{2} (t_{i+1} + t_i) \times (3\ 600 / 1\ 000)] \quad (1)$$

式中，P为植物的日同化总量，单位为mmol/(m²·d)；p_i为初测点*i*的瞬时光合作用速率，单位为μmol/(m²·s)；p_{*i*+1}为*i*+1测点的瞬时光合作用速率，单位为μmol/(m²·s)；t_{*i*}为初测点*i*的测量时间；t_{*i*+1}为*i*+1测点的测量时间。

3 调研地高固碳与低维护植物种类

本研究结果表明(表3)，乔木栾树的固碳量最高，为58.38 kg/年；灌木榆叶梅的固碳量最高，为5.91 kg/年。通过对调研地现状植物筛选与固碳量的计算，共提出34种具有较高固碳能力的植物，结合植物的观赏性和所处位置来指导碳汇单元植物景观设计方案。此外，优先筛选以生态功能为主导的本土植物种类，尤其以地被植物为主。植物应具有一定的抗逆性，能够适应粗放管理与有机质含量低、保水性差的土壤条件；并且具有一定的抗旱能力、水质净化能力，从而减少在养护过程中产生的碳排放。

表3 高固碳乔灌木植物名录
Tab. 3 The list of plants with high carbon fixation

植物类型 Plant type	植物名称 Plant name	叶面积指数 Leaf area index	树冠面积 /m ² Canopy area	年固碳量 / (kg/ 年) Annual carbon sequestration
乔木	栾树 (<i>Koelreuteria paniculata</i>)	8.34	48.62	58.38
	楸树 (<i>Catalpa bungei</i>)	4.96	8.04	23.65
	银杏 (<i>Ginkgo biloba</i>)	7.84	16.29	45.94
	紫叶李 (<i>Prunus cerasifera</i>)	6.64	14.39	11.34
	黄栌 (<i>Cotinus coggygria</i>)	5.98	4.62	9.56
	白玉兰 (<i>Yulania denudata</i>)	3.34	5.26	6.38
	构树 (<i>Broussonetia papyrifera</i>)	8.66	38.77	52.62
	垂柳 (<i>Salix babylonica</i>)	9.54	29.69	23.59
	樱花 (<i>Prunus×yedoensis</i>)	5.68	7.78	35.47
	女贞 (<i>Ligustrum lucidum</i>)	6.31	32.05	10.21
	荷花玉兰 (<i>Magnolia grandiflora</i>)	4.65	7.33	9.07
	石榴 (<i>Punica granatum</i>)	3.23	4.44	5.51
	榆叶梅 (<i>Prunus triloba</i>)	2.86	5.21	5.91
灌木	紫荆 (<i>Cercis chinensis</i>)	1.79	0.56	5.15
	大叶黄杨 (<i>Buxus megistophylla</i>)	4.86	—	5.29
	棣棠 (<i>Kerria japonica</i>)	4.23	—	4.56
	海桐 (<i>Pittosporum tobira</i>)	3.89	—	4.37
	龟甲忍冬 (<i>Lonicera japonica</i>)	2.68	—	3.13
	红花檵木 (<i>Loropetalum chinense</i>)	3.92	—	5.43
	红叶石楠 (<i>Photinia × fraseri</i>)	2.33	—	4.51
	粉花绣线菊 (<i>Spiraea japonica</i>)	2.06	—	3.67
	迎春 (<i>Jasminum nudiflorum</i>)	1.35	—	2.65

通过对研究地典型样方的地被植物碳汇量的测量与计算，得到研究地地被植物的年固碳量（表4）。地被植物年固碳量最高的为松果菊，年固碳量为2.76 kg/年，其次是芒、黄菖蒲、紫穗狼尾草、玉簪和鸢尾。

4 城市碳汇单元植物景观营建策略

结合实地调研及国内外相关研究，从兼顾多类型碳汇单元、植物群落组构和植物种类选择三个层面探究城市碳汇单元植物景观营建策略（图2）。

4.1 搭建碳汇单元景观模式，兼顾多种碳汇单元类型

在当前高密度城市大面积扩张绿地显然难以实现，必须通过提升现有城市绿地植物碳汇效益，解决绿地单元碳汇问题。传统城市绿地主要探讨依托于城市基底的空间单元碳汇提升研究，易忽视作为与人居环境关系更加密切的三维空间绿化。因此在搭建碳汇单元景观框架过程中需不再拘泥于传统平面，善加利用城市立面与顶面空间，采用精细化策略实现城市生态建设的“增量提质”方式^[14]。这种方法对缓解城市热岛效应和营造更舒适的人居环境小气候具有明显优势。但与此同时，多类型绿地碳汇单元受地形、基质、管护等条件制约。为使绿地达到

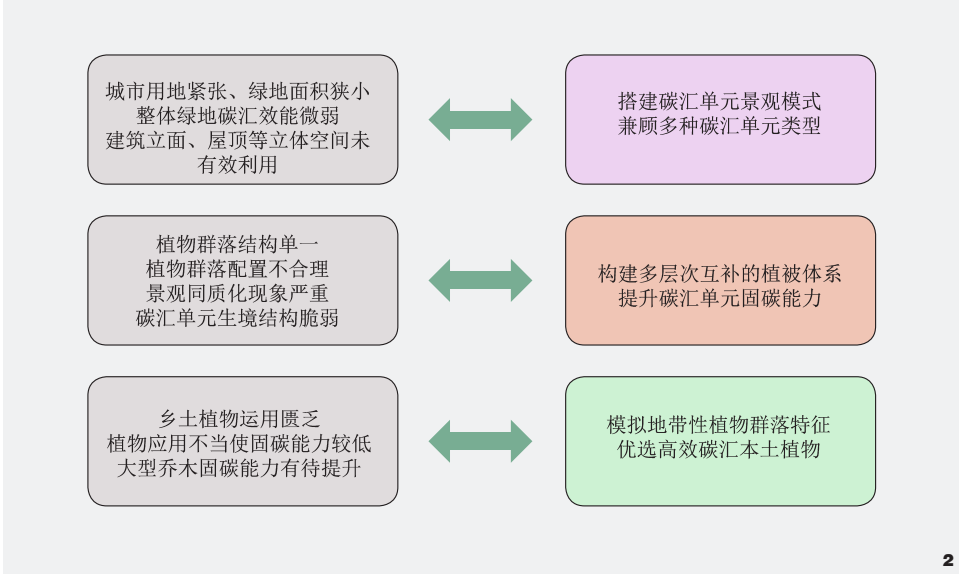


图2 城市碳汇单元植物景观营建策略
Fig. 2 Strategies for plant landscape construction in urban carbon sink units

预想效果，须对植物种类进行深入探讨，确保植物群落能够与其他组成要素相结合，实现固碳释氧、降低碳足迹，减少能源消耗的目标，构建出兼容传统平面绿化、建筑立体绿化、建筑屋顶绿化的三维耦合路径，以保持碳汇单元的整体性^[15]。

4.1.1 城市附属微绿地植物群落设计

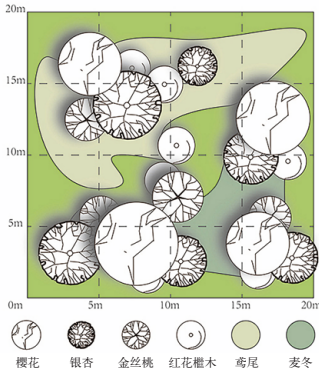
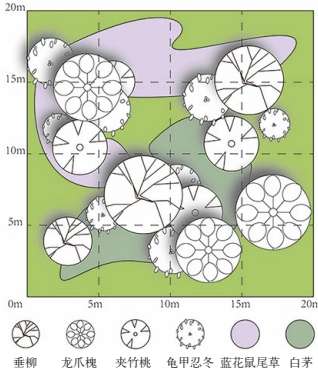
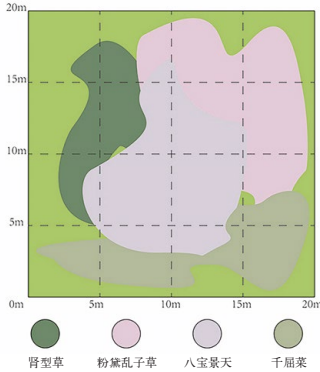
城市附属微绿地单元是改善城市生态环境、构建城市碳汇单元的关键环节，也是使用最为广泛、频率最高的城市绿地，旨在打

造绿色低碳空间，形成城市碳汇单元、满足居民观赏需求、调节城市局部小气候的绿色低碳空间^[16]。以海珀紫庭南侧绿地为例，可采用以下三种植物群落配置（表5）。群落一：新植4株日本樱花（*Cerasus yedoensis*）和金丝桃（*Hypericum monogynum*）、5株银杏、7株红花檵木，以及156.6 m²的鸢尾和126.3 m²的麦冬，有效改善植物群落的郁闭度和乔灌比，提升群落碳汇量。种植设计优化后，植物群落碳汇效益提高，其年固碳量由1 285.46 kg/年提升到1 426.46 kg/年。群落二：新植3株垂柳、

表4 高固碳地被植物名录
Tab. 4 The list of plants with high carbon fixation

植物名称 Plant name	年固碳量/(kg/年) Annual carbon sequestration	植物名称 Plant name	年固碳量/(kg/年) Annual carbon sequestration
松果菊 (<i>Echinacea purpurea</i>)	2.76	芒 (<i>Miscanthus sinensis</i>)	2.26
黄菖蒲 (<i>Iris pseudacorus</i>)	2.15	紫穗狼尾草 (<i>Pennisetum alopecuroides</i> ‘Purple’)	1.42
玉簪 (<i>Hosta plantaginea</i>)	1.32	鸢尾 (<i>Iris tectorum</i>)	1.29
崂峪薹草 (<i>Carex giraldiana</i>)	1.15	蓝羊茅 (<i>Festuca glauca</i>)	1.03
林荫鼠尾草 (<i>Salvia japonica</i>)	0.78	麦冬 (<i>Ophiopogon japonicus</i>)	0.19
垂盆草 (<i>Sedum sarmentosum</i>)	0.10	穗花婆婆纳 (<i>Veronica spicata</i>)	0.06

表5 海珀紫庭南侧绿地植物群落设计
Tab. 5 Design of plant community in the green space on the south side of Haipo Ziting

群落类型 Community type	群落一：乔灌丛+草本群落 Community one	群落二：乔灌丛+草本群落 Community two	群落三：草本群落 Community three		
平面示意					
	优化前 1 285.46	优化后 1 426.46	优化前 1 022.23	优化后 1 326.89	优化前 326.65

3株龙爪槐 (*Styphnolobium japonicum* ‘Pendula’)、4株夹竹桃 (*Nerium indicum*)、8丛龟甲忍冬以及146.3 m²的蓝花鼠尾草 (*Salvia farinacea*) 和139.5 m²的白茅 (*Imperata cylindrica*)，其年固碳量由1 022.23 kg/年提升至1 326.89 kg/年。群落三：新植粉黛乱子草 (*Muhlenbergia capillaris*) 146.3 m²、八宝景天 (*Hylotelephium erythrostictum*) 127.5 m²、肾型草 (*Heuchera micrantha*) 76.2 m²以及麦冬119.5 m²，其年固碳量由326.65 kg/年提升至526.25 kg/年。乔木层选用适应性强、固碳效果突出、病虫害少的乡土树种；灌木层种植低矮开花灌木，并搭配常绿观叶灌木，以延长绿地碳汇时限；草本层则选用低矮地被，并搭配低养护需求的观赏草，竖向增加绿地碳汇能力，丰富景观要素的同时，还构建了居住区绿地单元的高效碳汇植物景观^[17]。

4.1.2 生物滞留设施植物群落设计

生物滞留设施中植物“乔—灌—草”对雨水的截留主要通过茎秆径流和林冠截留两

种方式，因此需种植高大乔木来提供更多多样化的林下空间及负责构建顶层截留的林冠部分，通过不同区间的植物林冠设计，可增加林冠截留量和绿地单元碳汇能力。针对泮西里雨水花园结构上出现缺少乔灌木层等问题，可采用复层结构，将常绿乔木与观花、常绿灌木进行搭配，提升绿地单元碳汇效益的同时突出生物滞留设施雨洪调控能力，达到生态、功能、观赏相统一的效果^[18]。其可采用的植物群落配置类型如下，群落一：新植2株紫叶李、6株黄栌、6株迎春花 (*Jasminum nudiflorum*)、5丛海桐、152.6 m²的艾草 (*Hemisteptia lyrata*) 以及162.5 m²的迷迭香 (*Salvia rosmarinus*)，其中年固碳量由1 356.26 kg/年提升至1 526.35 kg/年。群落二：新植3株构树、5株荷花玉兰、3株南天竹 (*Nandina domestica*)、3株棣棠、203.5 m²的拂子茅 (*Calamagrostis epigeios*) 和159.8 m²的千屈菜 (*Lythrum salicaria*)，其年固碳量由985.56 kg/年提升至1 106.81 kg/年。群落三：87.3 m²垂盆草、105 m²沿阶草 (*Ophiopogon bodinieri*)、81.6 m²紫穗狼尾草、47.9 m²穗花婆婆纳以及69.7 m²的

三色堇 (*Viola tricolor*)，其年固碳量由556.56 kg/年提升至752.61 kg/年。乔木层植有高大乔木，弥补原场地缺乏冠层遮阴的问题；灌木层以观赏性好、适应性强的乡土植物为主；草本层以多年生、耐旱、喜湿、观赏期长的草本为主^[19] (表6)。

4.1.3 屋顶绿化植物群落设计

屋顶绿化是以服务功能性为主，针对屋顶绿化西部云谷二期内植物群落缺少冠层遮阳和草本层植物生长不良等问题。其可采用的植物群落配置类型如下，群落一：新植2株大花石榴 (*Punica granatum*)、4株三角枫 (*Acer buergerianum*)、6株紫叶小檗 (*Berberis thunbergii*)、5株八角金盘 (*Fatsia japonica*)、172.6 m²的玉簪以及92.5 m²的金盏菊 (*Calendula officinalis*)。其年固碳量由956.26 kg/年提升至1 011.62 kg/年。群落二：新植3株绣线菊 (*Spiraea salicifolia*)、3株洒金榕 (*Codiaeum Variegatum*)、2株榆叶梅、6株女贞以及186.9 m²的芒。其年固碳量由1 085.56 kg/年到1 225.61 kg/年。群落三：75.8 m²

的蒲苇 (*Cortaderia selloana*)、975 m²的鸢尾、72.4 m²的红花鼠尾草 (*Salvia coccinea*) 以及57.5 m²的单蕊拂子茅。其年固碳量由625.35 kg/年到723.36 kg/年。植物设计时应在乔木层选择株形高大、阔叶茂密、树姿优美的树种；搭配常绿灌木点缀层次；草本层种植抗逆性强、养护需求低的观赏草，既可以强化固碳能力，又充满自然野趣，增加群落的动态感 (表7)。

4.1.4 公园绿地小型斑块植物群落设计

公园绿地是城市绿地碳汇单元的重要构成要素，在对公园绿地碳汇单元小型斑块植物景观规划时，首先应先考虑生态斑块的基本原理，即尺度、形状、位置原理，其体现了不同生态斑块的内部特质；其次，应考虑不同场地的原生生境类型，基于场地生境条件进行设计；最后，应善于使用乡土

植物，营造出碳汇效益优、景观价值高的植物景观。西安世博园可采用的植物群落配置类型如下，群落一：新植乔灌丛+草本群落，楸树+黄栌—红花檵木+绣线菊—迷迭香+柳枝稷 (*Panicum virgatum*)，其年固碳量由1 096.81 kg/年升至1 361.62 kg/年；群落二：乔灌丛+草本群落，乌桕 (*Sapium sebiferum*) + 榆树 (*Ulmus pumila*) —山茶花 (*Camellia japonica*) +

表6 沔西里雨水花园植物群落设计
Tab. 6 Design of plant community in Fengxili Rainwater Garden

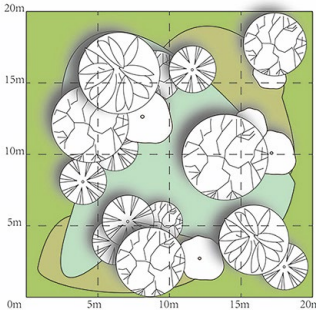
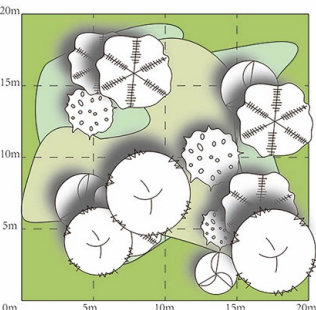
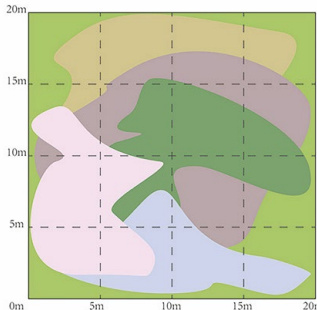
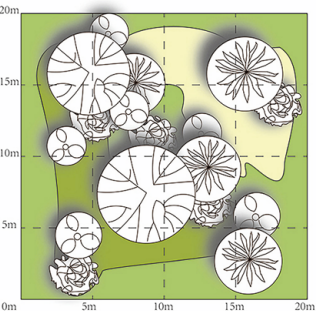
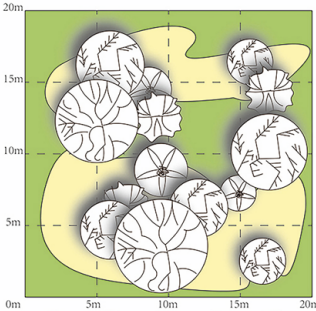
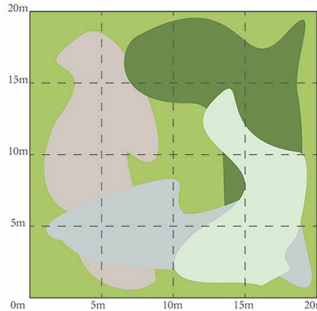
群落类型 Community type	群落一：乔灌丛+草本群落 Community one		群落二：乔灌丛+草本群落 Community two		群落三：草本群落 Community three	
平面示意						
						
年固碳量/(kg/年)	优化前		优化前		优化前	
	1 356.26		985.56		556.56	
	优化后		优化后		优化后	
	1 526.35		1 106.81		752.61	

表7 西部云谷二期屋顶绿化植物群落设计
Tab. 7 Design of roof greening plant community in Western Yungu Phase II

群落类型 Community type	群落一：乔灌丛+草本群落 Community one		群落二：乔灌丛+草本群落 Community two		群落三：草本群落 Community three	
平面示意						
						
年固碳量 /(kg/年)	优化前		优化前		优化前	
	956.26		1 085.56		625.35	
	优化后		优化后		优化后	
	1 011.62		1 225.61		723.36	

大叶黄杨—黑心金光菊 (*Rudbeckia hirta*) + 须芒草 (*Andropogon virginicus*), 其年固碳量由 1 126.56 kg/年升至1 345.45 kg/年; 群落三: 草本群落, 银边草 (*Arrhenatherum elatius*) + 蓝羊茅 + 美人蕉 (*Canna indica*) + 玉带草 (*Phalaris arundinacea*) + 佛甲草 (*Sedum lineare*), 其年固碳量由 525.63 kg/年升至602.42 kg/年 (表8)。

4.2 构建多层次互补的植被体系, 提升碳汇单元固碳能力

植物群落对城市绿地景观所产生的影响是多层次的, 结合调研分析结果, 探讨绿地植物群落结构设计策略, 有利于科学指导植物设计, 并提升碳汇单元固碳能力。植物群落层次结构越丰富, 植物数量或覆盖面积越大, 其固碳效益相对更高, 即复层植物群落结构>双层植物落结构>单层植物落结构, 且乔木固碳能力大于灌木和地被植物 (图3-a)。成龄乔木林的固碳释氧量相当于同面积草坪的3 ~ 5倍, 且复合层次植物群落结构具备更高质量的三维绿量、局部小气候、生物多样性、土壤质量, 因此固碳能力也更

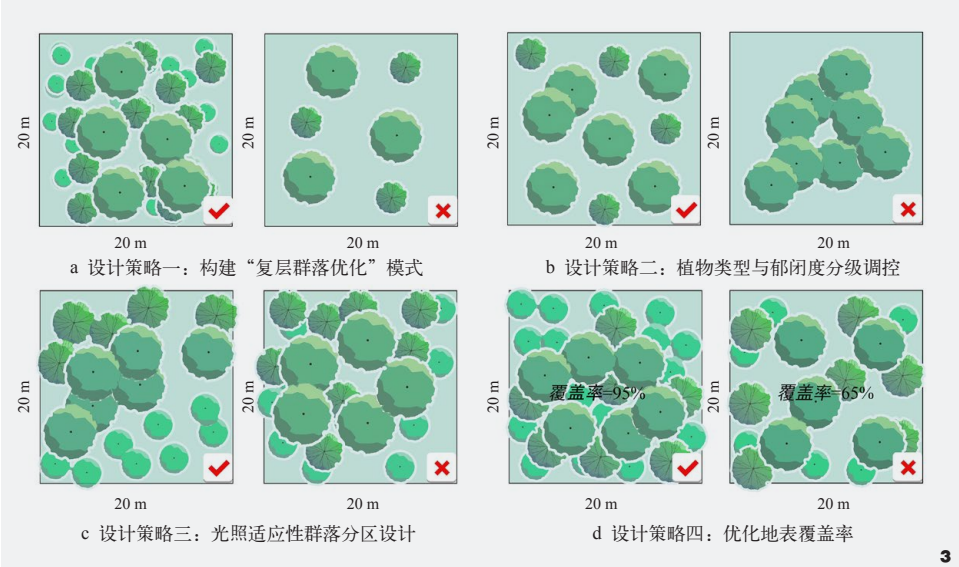


图3 植物群落配置设计策略
Fig. 3 Strategies of plant community configuration design

强^[20]。阔叶落叶和阔叶常绿植物混合栽植, 郁闭度控制在40% ~ 70%或85%以上等条件下, 群落的固碳能力较好 (图3-b)。当日照时长和太阳辐射在合适的阈值内, 植物固碳能力不断增加, 但超出临界值则会下降, 尤其针对灌木地被, 应当考虑阳生和阴生的不同

生境条件, 不耐日灼的布置在乔木层的北侧, 耐日灼的布置在乔木层的南侧 (图3-c)。此外尽可能全面覆盖地表, 在考虑经济性和减缓土壤水分蒸发的前提下, 可采用砾石覆盖或树皮覆盖, 能有效保存土壤含水量并提高局部空气质量和降温增湿能效 (图3-d)。

表8 西安世博园小型绿地斑块植物群落设计
Tab. 8 Design of plant communities in small green patches of Xi'an World Expo Park

群落类型 Community type	群落一: 乔灌木+草本群落 Community one		群落二: 乔灌木+草本群落 Community two		群落三: 草本群落 Community three	
平面示意						
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
	1 096.81	1 361.62	1 126.56	1 345.45	525.63	602.42

4.3 模拟地带性植物群落特征，优选高效碳汇本土植物

构建高效碳汇能力的复层植物群落结构，选择叶面积较大，枝冠开展，高度和冠幅较大的高固碳型植物，建立以“乔—灌—草”为主体的高效碳汇城市绿地植物群落，丰富绿地空间三维绿化指标，提升城市碳汇单元的固碳释氧能力^[2]。该过程中需因地制宜，综合地区气候、土壤、水文等环境因子，模拟地带性植物群落，优先选择适应本土气候特征及土壤环境的对病虫害抗逆性强的本土物种，一方面充分发挥本土物种的长效碳积累能力和局部极端气候适应性，保证城市碳汇单元植物持续稳定的发挥其整体生态价值；另一方面也可有效减少前期运输及后期管护成本，实现景观全生命周期践行低碳理念，促进城市环境的可持续发展。优选高固碳植物种类，尤其以乔木为主，因为它们在各种植物中发挥着更多的生态、功能、视觉景观效益，是最为突出的“骨骼框架”。对于场地内现存的大乔木，需进行合理的利用和保护，这些现存的大乔木不仅更适宜场地生境，往往具有一定的历史和文化价值，是该场地独有的符号，因此在设计过程中应该尽量保留它们的原貌，并通过合理布局和景观设计使其融入场地环境。根据调研研究数据显示，胸径规格范围在10 ~ 20 cm范围的幼、中龄树种固碳能力较强。

5 结论与讨论

基于城市碳汇单元的植物景观营造是响应当前“双碳”目标与构建城市绿色空间的重要路径。对城市中几类常见小尺度城市绿地单元进行植物景观优化设计探索，制定了乔灌丛+草本群落结构、灌木+草本藤本群落、草本群落结构的植物群落模式。以城市

小尺度绿地中的植物景观设计为切入点，将低碳理念渗透入城市绿地营建的全生命周期。综合考虑碳汇单元中的景观要素、分布尺度及用地属性，模拟地带性植物群落特征，推荐使用高固碳本土植物，优化碳汇单元内植物群落竖向空间结构，提高单位面积绿地的固碳能力。

随着各学科对低碳城市、低碳景观等研究不断向纵深发展，城市碳汇单元的响应机制愈发明了，这也是在“双碳”目标下对城市碳汇单元的生态价值提出了更高要求。因此，亟待从构成城市绿地景观的核心要素入手，充分认识植物是作为消解吸收城市温室气体的主要载体，在有限的城市绿地空间内，细化分析植物群落构成，探索设计绿量充足、固碳能力强、碳汇作用稳定的植物景观。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

[1] 包志毅, 马婕婷. 试论低碳植物景观设计和营造[J]. 中国园林, 2011, 27(01): 7-10.
[2] 徐昉, 李明慧, 施以, 等. 基于双碳目标的园林植物景观营建策略研究——以北京市海淀区公园为例[J]. 园林, 2023, 40(01): 34-41.
[3] 王晶懋, 高洁, 孙婷, 等. 双碳目标导向下的绿色生态空间碳汇能力优化设计[J]. 中国城市林业, 2023, 21(04): 33-42.
[4] 佟阳, 葛汶沁, 化剑, 等. 基于“双碳”目标下城市道路绿地构建途径研究——以西安奥体中心周边配套市政道路绿地设计为例[J]. 中国园林, 2023, 39(S2): 94-98.
[5] 庄贵阳, 周枕戈. 高质量建设低碳城市的理论内涵和实践路径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2018, 18(05): 30-39.
[6] 杨阳, 李家豪, 郑传慧. 近自然理念下西安市主城区微绿地植物景观优化设计研究[J]. 装饰, 2023(10): 132-135.
[7] 章银柯, 马婕婷, 王思, 等. 基于碳储量测定的低碳高效城市园林绿化建设思路探讨——以杭州西湖

风景名胜區为例[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(01): 221-226.
[8] 冀媛媛, 罗杰威, 王婷, 等. 基于低碳理念的景观全生命周期碳源和碳汇量化探究——以天津仕林苑居住区为例[J]. 中国园林, 2020, 36(08): 68-72.
[9] 王洪成. 探索城市生态修复的低碳园林途径[J]. 风景园林, 2017, 24(11): 80-85.
[10] 王晶懋, 刘晖, 宋王菲, 等. 基于场地生境营造的城市风景园林小气候研究[J]. 中国园林, 2018, 34(02): 18-23.
[11] 王晶懋, 齐佳乐, 韩都, 等. 基于全生命周期的城市小尺度绿地碳平衡[J]. 风景园林, 2022, 29(12): 100-105.
[12] 武艳芳, 易扬, 张桂莲, 等. 城市绿地碳核算方法及增汇减排技术研究进展[J]. 园林, 2024, 41(07): 74-80.
[13] 约翰逊, 威克思. 实用多元统计分析[M]. 陈旋, 叶俊, 译. 北京: 清华大学出版社, 2008.
[14] 李汇龙, 邵晓峰. 低碳语境下的城市街头绿地景观设计新途径——以南京栖霞区若干地块为例[J]. 中国城市林业, 2014, 12(04): 48-50.
[15] 张桂莲, 仲启敏, 张浪. 面向碳中和的城市园林绿化碳汇能力建设研究[J]. 风景园林, 2022, 29(05): 12-16.
[16] STROHBACH M W, ARNOLD E, HAASE D. The Carbon Footprint of Urban Green Space: A Life Cycle Approach[J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 104(02): 220-229.
[17] 赵旭. 低碳理念在城市园林植物景观设计中的应用研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
[18] 王晶懋, 刘晖, 范李一璇, 等. 城市市场地生境营造与植物群落设计评述[J]. 中国城市林业, 2022, 20(06): 41-47.
[19] 杨阳, 赵红红. 低碳园林相关理论研究的现状与思考[J]. 风景园林, 2015(02): 112-117.
[20] 李昱辉, 唐红. 基于低碳理念下的居住区景观全生命周期碳平衡研究[J]. 园林, 2024, 41(02): 111-118.
[21] 王铁飞. “双碳”目标背景下上海植物园北区扩建项目低碳实施路径研究[J]. 园林, 2022, 39(05): 111-117.